



---

# L'intelligence des abeilles

AUORE AVARGUÈS-WEBER

---

Malgré un cerveau minuscule comptant 100 000 fois moins de neurones que le nôtre, les abeilles possèdent des facultés cognitives étonnantes. Ces hyménoptères comptent, maîtrisent des concepts, raisonnent par catégories... et sont même plus rapides que les grands singes dans certaines tâches !

**L**es abeilles sont synonymes d'organisation sociale élaborée. De fait, une ruche comporte des dizaines de milliers d'ouvrières, toutes filles d'une seule reine, et qui assurent ensemble la survie de la colonie. Avec les fourmis et les termites, elles sont un modèle pour ceux qui étudient l'intelligence collective, c'est-à-dire comment des comportements complexes émergent

des interactions de nombreux agents qui n'ont pas « conscience » de ce qu'ils font. De fait, aucune abeille n'a en tête le plan de la ruche qu'elle construit avec ses sœurs. Pour autant, doit-on négliger l'individu face à la collectivité ? En d'autres termes, prise individuellement, l'abeille serait-elle incapable de manifester des comportements divers et complexes ?

Ses performances parlent pour elle. Dans la ruche, la plupart des tâches (nettoyage de la ruche, soin aux larves...) sont certes stéréotypées et déclenchées automatiquement par les stimuli (tactiles, olfactifs...). Il en va autrement lorsqu'elle va butiner : les recherches récentes ont révélé que les capacités cognitives mises en jeu sont remarquables. Elles sont d'autant plus étonnantes que l'abeille a un cerveau minuscule : 960 000 neurones qui tiennent dans moins de 1 millimètre cube, contre 100 milliards pour l'être humain... c'est 100 000 fois moins ! Comment expliquer ces prouesses ?

Rappelons d'abord que hors de sa ruche, une abeille peut se repérer dans un rayon de plus de 10 kilomètres et mémoriser les caractéristiques des sources de nourriture visitées : emplacement, disponibilité temporelle (certaines fleurs produisent plus ou moins de nectar selon l'heure), qualité (concentration en sucre)...

Depuis un siècle, l'abeille a fait l'objet de centaines d'études sur la perception, l'apprentissage et la mémoire. L'éthologue autrichien Karl von Frisch (1886-1982) en a

été le pionnier dès 1910 et en a été récompensé par le prix Nobel de physiologie en 1973. Il a notamment défini une méthodologie, toujours utilisée aujourd'hui, pour étudier la perception et la mémoire des abeilles.

### Un modèle de choix

Celles-ci ont un comportement dit de constance florale: lorsqu'elles rencontrent des fleurs contenant du nectar, elles en mémorisent les caractéristiques et ne visitent par la suite que les fleurs de la même espèce. Elles l'abandonnent après la visite de plusieurs fleurs «vides». Ce comportement permet d'entraîner les abeilles à récolter une solution sucrée associée à une

---

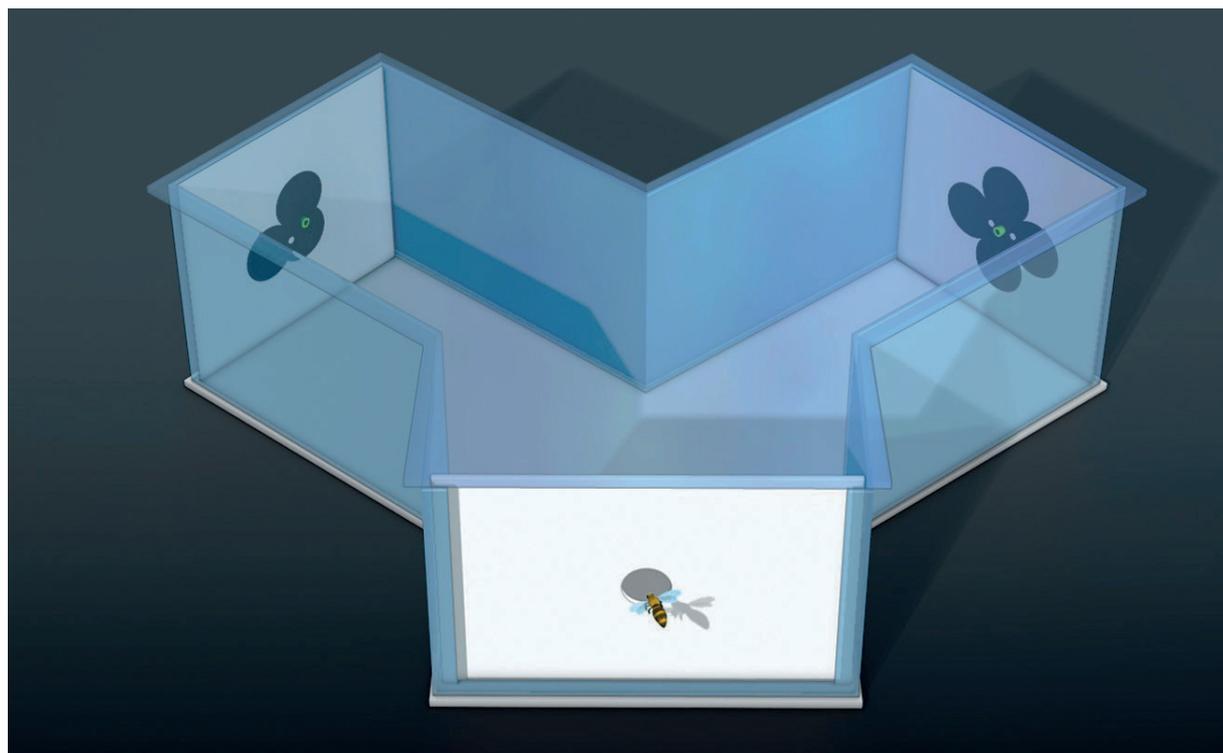
**Le labyrinthe en Y est idéal pour tester les capacités cognitives des abeilles. Dans l'une des branches se trouve un répulsif et, dans l'autre, une récompense (une solution sucrée) associée à ce qu'on cherche à apprendre à l'insecte (ici, à reconnaître une image symétrique). Après la phase d'apprentissage, l'abeille doit choisir entre de nouvelles images ayant ou non la propriété testée. Ici, elle choisira celle symétrique, à droite.**

image, qu'elles mémorisent et vers laquelle elles reviennent lors de leurs voyages successifs – et ce des heures durant. En proposant aux abeilles un choix entre plusieurs images, on détermine les éléments spécifiques perçus et mémorisés.

Par exemple, on teste si l'abeille apprend préférentiellement les formes ou les couleurs en l'entraînant avec un carré bleu associé à la récompense et en lui faisant ensuite choisir entre un carré gris et

un triangle bleu: si elle choisit le carré, c'est qu'elle a mémorisé la forme; si elle choisit le triangle, c'est qu'elle se souvient de la couleur.

Grâce à cette méthodologie, von Frisch a montré en 1914 que l'abeille perçoit le monde en couleurs, mais que son spectre visuel est décalé vers l'ultraviolet par rapport au nôtre. À l'époque, ces résultats ont suscité la polémique, car les dogmes religieux considéraient les couleurs des fleurs



© Bruno Bourgeois d'après A. Avargués-Weber

comme un cadeau divin pour l'humanité. On sait aujourd'hui qu'ils s'expliquent par une coévolution des fleurs et de leurs pollinisateurs. De nombreuses fleurs présentent ainsi des sortes de pistes d'atterrissage dans l'ultraviolet, c'est-à-dire des motifs visibles uniquement à ces longueurs d'onde et qui guident les pollinisateurs vers le nectar.

Les abeilles distinguent aussi les formes. Elles reconnaissent des images complexes, malgré une faible acuité visuelle (elles perçoivent des images très pixélisées, avec une résolution cent fois inférieure à la nôtre): elles savent, par exemple, reconnaître différents paysages forestiers voire des images complexes telles que des photographies de visages humains. Stockent-elles les images et les comparent-elles aux nouvelles pixel par pixel? Une telle technique, dite de *matching* (littéralement, de correspondance), serait simple, mais coûteuse en termes de mémoire. Les recherches récentes indiquent plutôt que l'abeille réalise un traitement cognitif élaboré de son environnement visuel.

En quoi consiste un tel traitement? L'homme, par exemple, effectue une

catégorisation, c'est-à-dire qu'il classe instantanément les objets de son environnement en catégories sur la base de similarités. Cette classification diminue la quantité d'informations à mémoriser, puisque seuls

**En raison de la complexité du traitement des images, on a longtemps considéré la capacité de catégorisation comme l'apanage des vertébrés. Cependant, on s'est aperçu dans les années 1990 que les abeilles sont aussi capables de catégorisation.**

les critères pertinents sont enregistrés. En outre, elle renseigne sur le comportement à adopter envers une entité (objet, animal...) avec laquelle on n'a jamais interagi, grâce aux interactions mémorisées avec d'autres entités de la même catégorie.

En raison de la complexité du traitement des images, on a longtemps considéré la capacité de catégorisation comme l'apanage des vertébrés. Elle a notamment été mise en évidence chez les primates, les dauphins et les pigeons. Cependant, on s'est aperçu dans les années 1990 que les abeilles sont aussi capables de catégorisation.

L'une de leurs catégories, mise en évidence en 1996 par Martin Giurfa, de

l'université de Toulouse, et ses collègues est la symétrie interne d'un objet. Ainsi, quand on associe une récompense sucrée à différents dessins présentant un axe de symétrie, les abeilles apprennent que le critère

récompensé est la symétrie. Cette catégorie leur est utile, car les fleurs, notamment, présentent une symétrie interne. Depuis, d'autres catégories ont été identifiées: paysages, plantes, fleurs, images orientées d'une même façon (composées, par exemple, de rayures)...

Les catégories du type paysage ou plante, dites perceptives, sont fondées sur des similarités visuelles. Elles ne nécessitent pas un traitement cognitif très élaboré. De même, la détection de la symétrie et de l'orientation est assez simple.

En revanche, deux autres types de catégories nécessitent des capacités cognitives supérieures, en raison d'un degré

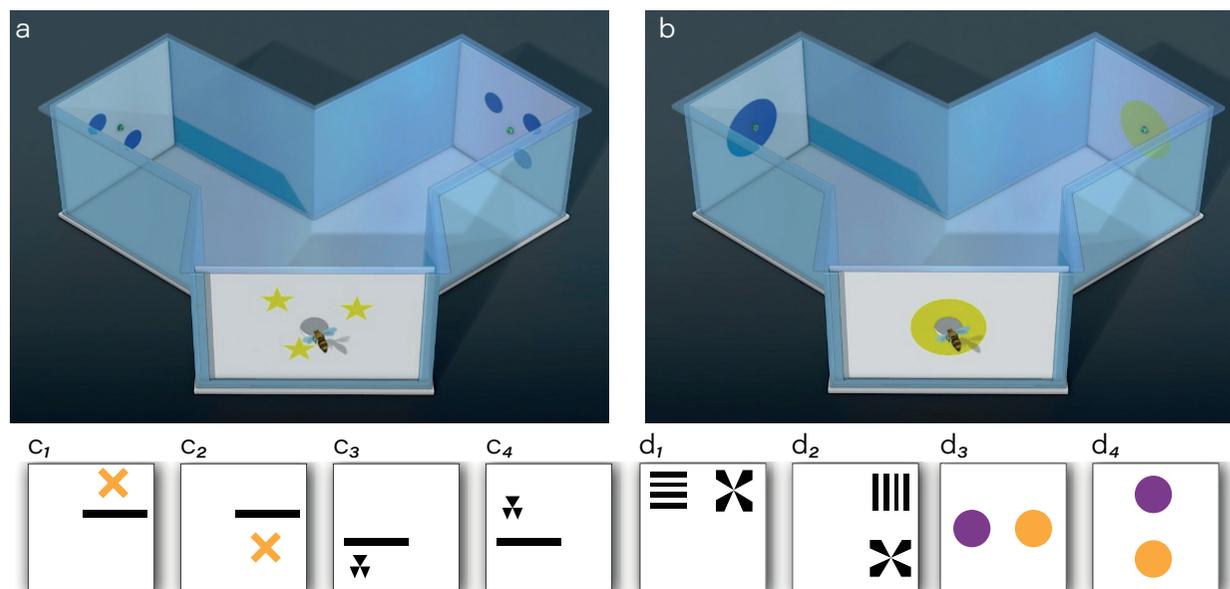
supplémentaire d'abstraction: les catégories fonctionnelles et les catégories conceptuelles. Les premières dépendent de la fonction de l'objet (nourriture, meuble...), indépendamment de son apparence; on ignore si les abeilles sont capables d'une telle catégorisation. Les secondes regroupent des objets ou des événements liés par une relation particulière, telle que «avant», «au-dessus», «plus grand que», «identique», etc. (en sciences cognitives, un concept est défini par une telle relation).

Les concepts relationnels sont difficiles à appréhender. Une girafe et la Tour Eiffel seront ainsi regroupées dans la même catégorie, celle des entités «grandes» (par comparaison implicite aux autres animaux et aux autres monuments), alors qu'elles ont peu de chose en commun. Les concepts relationnels ne peuvent se former qu'à partir de multiples exemples concrets, avec des objets donnés. Leur comparaison permet au cerveau de dégager une relation commune, au-delà des différences entre les images. Cette relation devient alors abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets qu'elle lie.

Chez l'homme, l'abstraction – et donc l'acquisition des concepts relationnels – est facilitée par le langage. Il n'est cependant pas indispensable, car les jeunes enfants (ceux qui savent déjà parler), les primates

et les dauphins parviennent à maîtriser des concepts relationnels, mais c'est au prix d'un long entraînement. On ne s'attendait donc pas à ce que les abeilles, avec leur cerveau miniature et l'absence

**Les concepts relationnels sont des relations liant les objets. Les abeilles en maîtrisent trois : « identique à », « en même nombre que » et « au-dessus de ». Dans un labyrinthe en Y, elles peuvent apprendre à choisir la branche terminée par une image de couleur identique à celle présentée à l'entrée (a) ou comportant le même nombre d'éléments (b). Après l'avoir apprise avec des couleurs, elles transfèrent même la règle d'identité à des formes et à des odeurs. De même, elles peuvent apprendre à se diriger vers certaines configurations spatiales : celles où un objet est au-dessus d'une barre de référence (c1 et c4) plutôt que celles où il est au-dessous (c2 et c3); celles où deux objets sont l'un au-dessus de l'autre (d2 et d4) plutôt que celles où ils sont côte à côte (d1 et d3). Dans tous les cas, les images récompensées n'ont en commun que la relation à apprendre, tel le nombre d'éléments. Pour les abeilles, cette relation devient donc abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets.**



© Bruno Bourgeois d'après A. Avergués-Weber

d'un langage élaboré, réalisent de telles prouesses cognitives.

Pourtant, depuis le début des années 2000, on a montré qu'elles peuvent maîtriser plusieurs concepts relationnels. Devant l'étonnement des scientifiques, un grand nombre d'expériences et de vérifications ont été effectuées, bien plus que lors d'études similaires sur les primates.

### **Compter jusqu'à 4**

En 2001, Martin Giurfa et ses collègues ont ainsi appris à des abeilles à reconnaître le concept relationnel d'identité. Pour ce faire, ils les ont introduites dans un labyrinthe en Y où une même couleur était indiquée à l'entrée et dans une des branches (contenant une récompense sucrée). Après une phase d'entraînement, non seulement les abeilles se dirigeaient vers la branche repérée par la couleur présente à l'entrée, mais elles étaient capables de transférer cette règle d'identité à des formes et, de façon surprenante, à des odeurs !

Grâce à un dispositif expérimental similaire, les abeilles peuvent apprendre à choisir l'image comportant le même nombre

d'éléments que celle présentée à l'entrée du labyrinthe, et ce, même quand ces éléments ne se ressemblent pas et sont disposés différemment. C'est ce qu'ont montré en 2009 Hans Gross, de l'université de Würzburg, en Allemagne, et ses collègues. Les abeilles savent donc compter, mais seulement jusqu'à quatre : à partir de cinq objets, elles ne réussissent plus l'expérience.

Dans l'équipe de Martin Giurfa, au sein de laquelle j'ai travaillé de 2007 à 2010, nous avons testé un autre concept

### **Les abeilles apprennent ces concepts relationnels bien plus vite que les primates**

relationnel chez l'abeille : la configuration spatiale relative de différents éléments. Les insectes ont ainsi été confrontés à des images où un objet (variable) était situé tantôt au-dessus et tantôt au-dessous d'une barre horizontale, et entraînés à choisir celles où il était au-dessus. On a ensuite compliqué la tâche, en supprimant la barre de référence ; dans ce dernier

cas, deux objets quelconques étaient placés tantôt l'un au-dessus de l'autre, tantôt côte à côte. Divers tests ont permis de vérifier que les abeilles fondaient bien leur choix sur la position relative récompensée (ici « au-dessus de ») et non sur d'autres éléments (similarités visuelles, orientation globale, position absolue des éléments dans l'image...).

Le plus étonnant est que les abeilles apprennent ces concepts relationnels bien plus vite que les primates. En outre, elles semblent les extraire « naturellement » des images perçues afin de les utiliser comme critère de classification : dans les expériences sur les concepts spatiaux, elles ont ainsi repéré une relation de différence sans que celle-ci soit récompensée. Lors de l'apprentissage, les objets d'une même image étaient toujours différents, qu'ils soient liés par la relation spatiale récompensée ou non. Or, quand on présentait par la suite aux abeilles des objets liés par cette relation, mais identiques, elles ne les choisissaient pas plus souvent que d'autres. Elles avaient donc intégré le concept relationnel « différent » comme critère de choix.

En quoi les concepts relationnels sont-ils utiles aux abeilles? Plusieurs hypothèses ont été proposées. D'abord, ils aident à classer par catégories les objets, les scènes et les événements bien plus efficacement qu'en se fondant juste sur des similarités perceptives. Selon une théorie controversée, l'abeille s'en servirait pour établir une «carte mentale» de son environnement. En effet, quand elle connaît la localisation de deux sources de nourriture par rapport à la ruche, elle sait aller directement de l'une à l'autre sans avoir jamais effectué ce trajet, et ce dans un rayon de dix kilomètres autour de la ruche. Cette carte pourrait être fondée sur une représentation mentale des relations spatiales entre différents repères visuels perçus lors de ses déplacements, tels des arbres ou des poteaux – et donc sur des concepts relationnels.

### Une préférence pour la configuration

Ces concepts pourraient aussi permettre aux abeilles de reconnaître les objets malgré les variations d'angle de vue, de couleur et de texture, ou quand ils sont partiellement cachés. Une telle reconnaissance est

plus fiable quand l'analyse se fonde sur les relations spatiales entre les éléments qui composent l'objet plutôt que sur leur aspect.

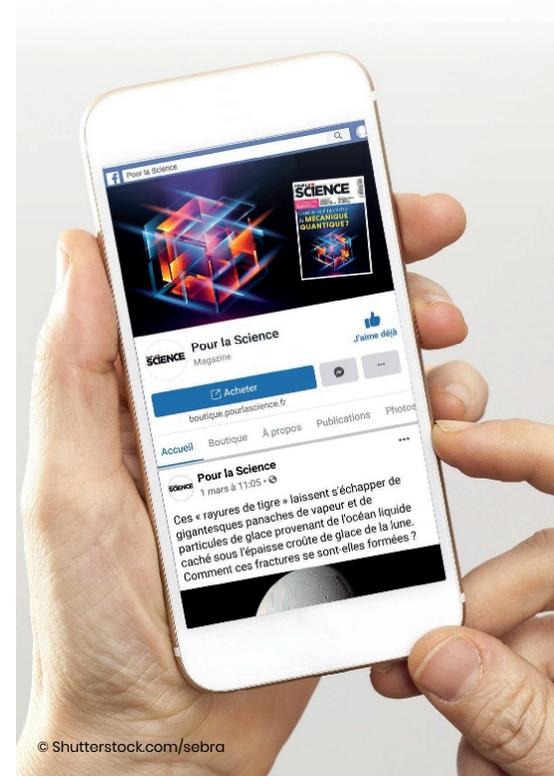
L'utilisation des configurations spatiales pour la reconnaissance d'images a été presque exclusivement étudiée chez l'homme. Pourtant, une expérience réalisée en 2010, toujours au sein de l'équipe de Martin Giurfa, suggère que les abeilles en sont aussi capables. Nous leur avons appris à reconnaître des configurations de type visage, obtenues à partir de ronds et de traits: les insectes distinguaient quand ces éléments formaient un visage ou non!

En outre, lorsqu'on leur laisse le choix des critères utilisés pour reconnaître une image complexe, les abeilles se reposent préférentiellement sur la configuration des éléments de l'image plutôt que sur leur analyse individuelle. Nous avons ainsi appris aux abeilles à reconnaître une grande forme dessinée par de petits éléments, tel un carré composé de petits losanges. Quand on soumet ensuite les insectes à un carré dessiné par de petits triangles et à un cercle dessiné par de petits losanges, ils choisissent le premier: ils se fondent donc sur la configuration des

# Pour la Science

Retrouvez nos derniers articles

-  @pouirlasciencemag
-  @pouirlascience
-  @PourlaScience



© Shutterstock.com/sebra

éléments (la forme globale en carré qu'ils dessinent) plutôt que sur ces éléments eux-mêmes (leur forme de losange). C'est le cas aussi chez l'homme, mais pas chez les autres primates, dont la perception est dominée par le niveau élémentaire.

L'utilisation de concepts relationnels par l'abeille n'est-elle pas un artefact des expériences, dû aux entraînements reçus? Non, quelques éléments laissent penser qu'elles manifestent aussi ce comportement dans la nature. Par exemple, nous l'avons vu, elles ont extrait des relations entre les éléments sans que ces relations soient directement récompensées.

Quoi qu'il en soit, la manipulation de concepts relationnels est une tâche cognitive ardue. En effet, elle nécessite un réseau de neurones codant la relation (par exemple «sur»), qui s'active pour tous les cas mettant en jeu cette relation. Ce réseau doit être activé de la même façon quels que soient les objets concernés, un chat sur un toit et une bouteille sur une table.

La coactivation de ce réseau et du circuit de détection du sucre permettrait à l'animal d'apprendre la règle à suivre pour obtenir la récompense. Chez les abeilles, la recherche de nourriture stimulerait le recrutement d'un système neuronal codant

les similarités relationnelles. Les raisons pour lesquelles ce processus est plus rapide que chez les primates sont mal connues. La complexité du cerveau de ces derniers entraîne-t-elle de multiples traitements superflus, qui ralentissent l'élaboration des concepts? Est-ce une question de motivation? Une différence dans le codage neuronal des concepts? Cela reste à déterminer.

Aucun réseau associé à un concept relationnel particulier n'a encore été localisé. Cependant, chez les primates, sur la base d'études d'imagerie cérébrale, on pense que ces réseaux se situent dans le cortex préfrontal (à l'avant du cerveau),

---

## APPRENDRE À PARLER UNE DANSE ÉTRANGÈRE

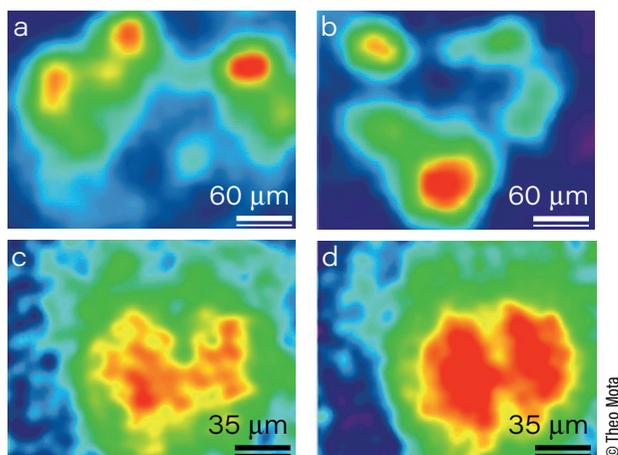
Dans les années 1940, l'éthologue autrichien Karl von Frisch, pionnier des recherches sur les abeilles, a découvert l'existence d'un « langage » chez cet insecte. Il est constitué d'une danse, grâce à laquelle les butineuses indiquent la direction et l'éloignement des sources de nourriture à leurs congénères. Pour une source éloignée, la danse forme

un huit, dont l'inclinaison par rapport à la verticale traduit la direction par rapport au Soleil. En parallèle, la danseuse fait vibrer son abdomen à une fréquence qui renseigne sur l'éloignement de la source de nourriture : plus elle est élevée, plus la source est lointaine.

La capacité à communiquer est intéressante d'un point de vue évolutif,

mais ne trahit pas nécessairement une intelligence très développée. En effet, elle peut être stéréotypée et innée. Cependant, en 2008, Su Songkun, de l'université de Zhejiang, en Chine, et ses collègues, ont montré que les abeilles manifestent d'impressionnantes capacités d'apprentissage et d'adaptation, qui supposent une grande

plasticité cérébrale. Pour ce faire, ils ont placé des abeilles européennes parmi des consœurs asiatiques, dont la danse est calibrée différemment (la correspondance entre l'éloignement et la fréquence de vibration de l'abdomen n'est pas identique). En peu de temps, les nouvelles venues ont appris à « parler » la danse locale !



**La perception des odeurs et des couleurs n'est pas assurée par les mêmes aires cérébrale chez l'abeille (en a et b, les zones activées dans les lobes antennaires par deux odeurs; en c et d, celles activées dans le tubercule optique par le bleu et par le vert). Pourtant, l'abeille arrive à transférer à des odeurs une relation d'identité apprise avec des couleurs. Cette relation doit donc être codée séparément dans le cerveau.**

tandis que les catégories perceptives sont plutôt enregistrées dans le cortex temporal inférieur, siège de la reconnaissance des objets.

Le siège des concepts relationnels chez l'abeille serait donc à chercher dans une structure cérébrale équivalente (mais non homologue), recevant des informations de

tous les systèmes sensoriels après traitement dans les aires spécialisées.

Chez l'abeille, une aire cérébrale nommée corps pédonculés pourrait être cet équivalent du cortex préfrontal et traiter les concepts. En effet, elle reçoit tous les types d'informations sensorielles. En outre, cette aire est particulièrement développée chez l'abeille, ainsi que chez les autres hyménoptères (telles les guêpes et les fourmis), les scarabées et les cafards. Chez les hyménoptères, on attribue ce développement à la vie sociale, impliquant des interactions complexes; il aurait ensuite permis un traitement cognitif élaboré des données visuelles.

Toutefois, le rôle des corps pédonculés reste mal connu. On a seulement montré qu'ils interviennent dans la mémorisation olfactive. Lors de plusieurs études menées dans les années 2000, on a appris aux abeilles à associer une odeur à une récompense sucrée et on a observé le rôle des corps pédonculés dans la mémorisation: lorsque cette structure cérébrale était détruite ou inhibée par des substances chimiques, les abeilles ne parvenaient plus à mémoriser les odeurs.

Comment observer le cerveau des abeilles en fonctionnement et vérifier l'implication des corps pédonculés? Les techniques d'IRM sont inadaptées, car leur résolution est de l'ordre du millimètre, soit la taille du cerveau de l'abeille. En revanche, la robustesse de l'abeille autorise les méthodes invasives. On réalise donc de l'imagerie cérébrale en ouvrant la cuticule du crâne, puis en injectant un colorant dans le cerveau: cette substance se colore en présence des ions calcium libérés par les neurones actifs. On observe alors le cerveau de l'abeille au microscope.

On utilise aussi l'électrophysiologie: ici, on mesure directement l'activité de neurones et d'ensembles de neurones en implantant des électrodes dans le cerveau des insectes.

La seule limitation, en passe d'être résolue, est la difficulté d'étudier des apprentissages complexes sur des abeilles immobilisées en laboratoire. Cette immobilisation est nécessaire pour l'imagerie cérébrale et l'enregistrement de l'activité du cerveau. Or une abeille immobilisée peine à apprendre de simples couleurs et est incapable de mémoriser des concepts relationnels. Une solution

en cours de développement serait d'utiliser des simulateurs de vol ou de marche, qui donneraient l'impression d'un mouvement libre à l'abeille pourtant immobilisée. Des dispositifs de ce type ont déjà été mis au point par plusieurs équipes de l'université de Queensland, en Australie, et sont en cours de développement dans notre laboratoire toulousain. En parallèle, des modélisations de ces apprentissages devront être réalisées pour comprendre leurs fondements neuronaux. Dans une telle modélisation, un neurone virtuel intègre des stimulations excitatrices ou inhibitrices en provenance d'autres neurones. Quand un certain seuil d'excitation est atteint, il envoie un message excitateur ou inhibiteur à d'autres neurones.

En 2011, l'équipe de Barbara Webb, de l'université d'Édimbourg, en Écosse, a obtenu des premiers résultats pour des apprentissages simples (la mémorisation d'odeurs) chez la drosophile, dont le cerveau est bien moins complexe que celui de l'abeille. Dans sa simulation, la perception d'une molécule odorante entraînait l'activation d'un ensemble de neurones, chacun réagissant à une caractéristique chimique particulière.

Lorsque cet ensemble était activé en même temps que les neurones détectant la récompense sucrée, les synapses connectant les neurones en jeu étaient potentialisées, c'est-à-dire qu'elles devenaient plus efficaces pour transmettre le signal. Après quelques essais virtuels, l'activation du circuit neuronal codant l'odeur suffisait à activer celui de la détection du sucre. C'est ainsi qu'un insecte réel serait attiré vers la source de l'odeur. Barbara Webb en déduit que pour mémoriser une odeur, ce n'est pas le nombre de neurones qui importe mais celui de synapses. La simulation de l'encodage d'apprentissages plus complexes, tels ceux de catégories perceptives, chez les abeilles, sont à l'étude.

Le cas des abeilles montre que la manipulation de concepts relationnels n'est pas l'apanage des vertébrés. L'étude de ces facultés chez l'insecte devrait nous renseigner sur la complexité cérébrale minimale permettant d'atteindre de tels niveaux cognitifs. Les concepteurs de robots miniatures s'empareront sûrement de ces résultats !

---

Article publié dans *Pour la Science*  
n° 429 juillet 2013

---



---

**Aurore Avarguès-Weber**  
est chercheuse au CNRS  
au Centre de recherche sur la  
cognition animale  
à l'université Toulouse 3.

---

#### BIBLIOGRAPHIE

- A. Avarguès-Weber et M. Giurfa**, Conceptual learning by miniature brains, *Proc. R. Soc. B*, vol. 280, art. 20131907, 2013
- A. Avarguès-Weber et al.**, Simultaneous mastering of two abstract concepts with a miniature brain, *PNAS*, vol. 109, pp. 7481-7486, 2012.
- A. Avarguès-Weber et al.**, Visual cognition in social insects, *Annual Review of Entomology*, vol. 56, pp. 423-443, 2011.
- L. Chittka et H. Jensen**, Animal cognition : concepts from apes to bees, *Current Biology*, vol. 21, pp. 116-119, 2011.
- M. Srinivasan**, Honey bees as a model for vision, perception, and cognition, *Annual Reviews of Entomology*, vol. 55, pp. 267-284, 2010.